

# Arrancamiento de fibras de acero de matriz de Hormigón

*Facundo A. Isla<sup>1</sup>, Bibiana Luccioni<sup>2</sup>, Rodrigo D. Isas Pedraza<sup>3</sup>, Domingo Sfer<sup>4</sup>*

## RESUMEN

En los últimos años se han desarrollado estudios experimentales que muestran las mejoras obtenidas en el comportamiento estructural al incorporar fibras al hormigón. Las fibras controlan la fisuración aumentando la ductilidad de los elementos estructurales. Este efecto está directamente relacionado con la resistencia al arrancamiento de las fibras que depende de la fibra, la matriz y la interfaz fibra-matriz. Los resultados experimentales muestran gran variabilidad en el comportamiento, aún para un mismo tipo de fibra e igual calidad de hormigón. Esta variabilidad se atribuye a la matriz de hormigón, la cual produce diferencias en la interfaz. En este trabajo se estudia experimental y numéricamente el fenómeno de arrancamiento de fibras de acero con ganchos, desde una matriz de hormigón. Se presentan los resultados experimentales de ensayos de arrancamiento de distintos tipos de fibras. Esto permite determinar parámetros necesarios para la simulación numérica. En el modelo numérico desarrollado el modelo de fibras con deslizamiento está implementado como una componente de un compuesto, con lo cual es posible estudiar el comportamiento de una fibra individual o de un conjunto de fibra dispersas en forma homogénea en una matriz. Con dicho modelo se realizan simulaciones del ensayo de arrancamiento de fibra cuyos resultados se comparan con los resultados experimentales.

*Palabras clave:* Fibra, acero, hormigón, gancho, fricción, compuesto.

---

<sup>1</sup> Ing. Civil. CONICET. E-Mail: [fisla@herrera.unt.edu.ar](mailto:fisla@herrera.unt.edu.ar)

<sup>2</sup> Dr. Ing. Civil. CONICET. E-Mail: [bluccioni@herrera.unt.edu.ar](mailto:bluccioni@herrera.unt.edu.ar)

<sup>3</sup> Ing. Civil. ANPCT. E-Mail: [rdisas@herrera.unt.edu.ar](mailto:rdisas@herrera.unt.edu.ar)

<sup>4</sup> Dr. Ing. Civil. E-Mail: [dsfer@herrera.unt.edu.ar](mailto:dsfer@herrera.unt.edu.ar)

<sup>1 2 3 4</sup> Instituto de Estructuras, Univ. Nacional de Tucumán, Av. Presidente Néstor Kirchner 1800, CP 4000. S. M. de Tucumán, Argentina - [www.herrera.unt.edu.ar/iest](http://www.herrera.unt.edu.ar/iest)

## 1 Introducción

El hormigón reforzado con fibras (HRF) es un hormigón en el que se introducen fibras de diversos tipos, dispersas en la matriz frágil con el fin de mejorar la capacidad de absorción de energía y controlar el desarrollo de fisuras. De este modo, se aumenta la vida en servicio de las estructuras, en especial, cuando se ven expuestas a acciones dinámicas. Es evidente que las propiedades de los HRF dependen directamente del tipo, contenido, orientación y distribución de las fibras. Para activar el mecanismo de trabajo de las fibras, es necesaria la generación de fisuras en la matriz. Las fibras actúan cociendo las fisuras y retardando su propagación, lo cual favorece el desarrollo de múltiples fisuras de menor tamaño. Si hay suficiente cantidad y están uniformemente distribuidas, evitan que las microfisuras se unan, con lo cual se aumenta la resistencia a tracción aparente de la matriz.

La resistencia a tracción del HRF es una acción conjunta entre la resistencia de la matriz y la de las fibras que atraviesan las fisuras. La adherencia entre las fibras y la matriz posee varios componentes: la adhesión física y/o química, la resistencia friccional y un componente mecánico asociado con la geometría de la fibra que actúa como anclaje. En la mayoría de los casos las fibras, en lugar de romperse, son arrancadas de la matriz una vez que perdieron la adherencia con la misma. Por lo tanto, cuanto más largas sean las fibras, mayor será la capacidad de resistir las fuerzas de arrancamiento. Este fenómeno de arrancamiento de barras embebidas en una matriz, normalmente se estudia mediante ensayos que en la bibliografía especializada se denominan comúnmente ensayos de “*Pull Out*”. Se pueden encontrar resultados de este tipo de ensayos en los trabajos realizados por Alwan (1990), Naaman (1991), Bazant (1995), Naaman (1996), Chanvillard (1999), Guerrero (2000), Barragán (2002), Robins (2002), Naaman (2003), Sujivorakul (2003), Kanstad (2007), Cunha (2007) y Cunha (2008).

En el caso de fibras de acero lisas (eje recto) inmersas en hormigón, las componentes básicas que contribuyen a la resistencia al arrancamiento son la adhesión y la fricción. En la Figura 1 se muestra la relación entre tensiones tangenciales en la interfaz fibra-matriz y el deslizamiento de la fibra. Al someter la fibra a una fuerza axial (ver Tabla 1), inicialmente actúa la adhesión en toda la longitud de la fibra. Las tensiones tangenciales en la interfaz fibra-matriz no son uniformes, generándose las máximas tensiones en la zona próxima a la fisura. Si se incrementa la fuerza hasta superar la resistencia a la adhesión, la fibra se empieza a despegar de la matriz (la interfaz pierde adhesión) y comienza a trabajar la fricción en estas zonas. Cuando toda la interfaz pierde adhesión, se inicia el deslizamiento con una brusca caída de la resistencia al arrancamiento donde trabaja únicamente la fricción. A medida que la fibra es extraída, la fricción disminuye, debido a una acción combinada de abrasión y compactación del cemento y partículas de arena alrededor de la fibra. Para evitar que se produzca una caída brusca de la resistencia al arrancamiento cuando se agota la adhesión, se emplean fibras con geometrías particulares, como fibras con ganchos, rizadas, con cabezas o

botones en los extremos, o fibras de sección poligonal torsionadas. Con esto se logra una componente mecánica adicional en la resistencia al arrancamiento.

La resistencia al arrancamiento también depende de la integridad de la matriz, si la matriz se desintegra a medida que se extrae la fibra, no se podrá aprovechar eficientemente la capacidad resistente y ductilidad de la fibra. Por esta razón, algunos autores han probado combinar fibras de distinto tamaños donde las fibras más cortas son las encargadas de mantener la matriz estable mientras las fibras largas cosen las fisuras más importantes, desarrollando al máximo la capacidad de estas últimas (Markovich, van Mier y Walraven 2001).

Figura 1: Relación Tensión tangenciales vs deslizamiento

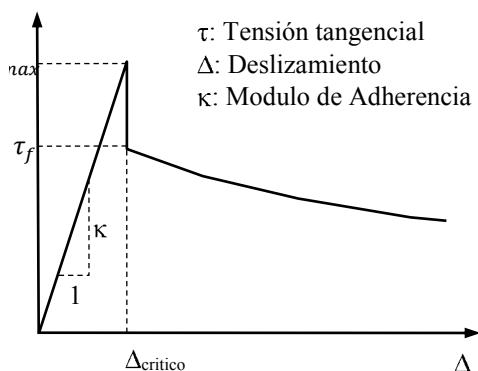


Tabla 1: Proceso de pérdida de adhesión y distribución de tensiones tangenciales en interfaz.







Estado de interfaz	Adhesión en toda la interfaz	Pérdida parcial de adhesión
Desplazamiento	$\Delta_1 < \Delta_{\text{critico}}$	$\Delta_{\text{critico}} < \Delta_2$
Esquema de fibra Lisa en matriz		
Distribución de tensiones tangenciales en la longitud embebida de la fibra	<p><math>\tau &lt; \tau_{\text{max}}</math></p> <p>Adhesión</p>	<p><math>\tau_{\text{max}}</math></p> <p><math>\tau_f</math></p> <p>Adhesión      Fricción</p>

En este trabajo se estudian experimental y numéricamente los distintos mecanismos que tienen lugar durante el arrancamiento de fibras con ganchos y que contribuyen a la resistencia al arrancamiento. El estudio está basado en un programa experimental donde se realizaron ensayos de arrancamiento con distintos tipos de fibras de acero, pero con igual calidad de matriz. Se desarrolló también un estudio numérico consistente en la implementación de un modelo cuyos parámetros, correspondientes a la matriz de hormigón, se ajustaron para un tipo de fibra. Luego se utilizó el modelo calibrado para la simulación numérica de los ensayos de arrancamiento de otros tipos de fibras y un ensayo de tracción de HRF.

## 2 Estudio experimental

El objetivo del programa experimental es estudiar el mecanismo y evaluar la resistencia al arrancamiento y el deslizamiento de las fibras de acero con ganchos, para los materiales disponibles en el mercado local. Para ello se fabricaron 63 probetas de arrancamiento (Figura 2) con una misma calidad de matriz y 5 tipos de fibras (ver Tabla 2), de las cuales 10 se ensayaron en las instalaciones del Laboratorio de Entrenamiento Multidisciplinario para la Investigación Tecnológica (LEMIT) y las 53 restantes en el Instituto de Estructuras de la UNT. En ambos casos se empleó un equipo INSTRON con control de desplazamiento.

Tabla 2: Designación de los tipos de fibras y especificaciones de fábrica.

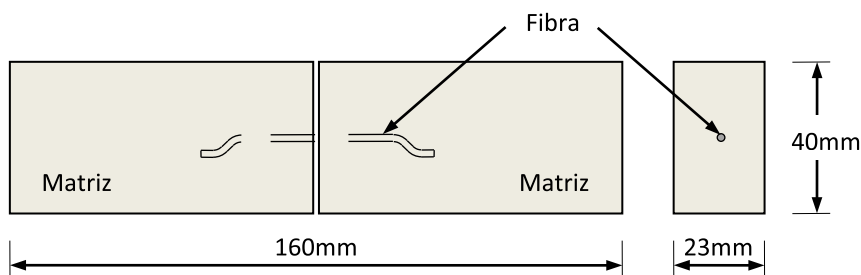
Designación	Fotografía	$f_y$ [MPa]		$\varnothing$ [mm]	L [mm]
		s/fabrica	s/ensayo		
Fibra 1		>800	860	1.00	50
Fibra 2		>1100	1100	1.10	50
Fibra 3		>1100	1100	0.75	50
Fibra 4		>2300	2470	0.71	60
Fibra 5	 	>2300	2470	0.45	35

$f_y$ : tensión de fluencia;  $\varnothing$ : diámetro; L: longitud

### 2.1 Características de la probeta de arrancamiento

Las probetas tienen una forma prismática de sección rectangular, con una interrupción en el centro de la longitud que las separa en dos mitades, las cuales están vinculadas únicamente por una fibra dispuesta en el centro de la sección, ver Figura 2.

Figura 2: Probeta de arrancamiento - Dimensiones.



Las probetas se ensayaron a tracción uniaxial. La interrupción de la matriz simula la fisura, permitiendo evaluar la resistencia al arrancamiento de la fibra.

### 2.1.1 Matriz

Se usó un mortero de hormigón autocompactante (HAC) para prescindir del vibrado en el llenado de los moldes, ya que el vibrado podría modificar la orientación preestablecida de la fibra. La dosificación del HAC corresponde a una relación agua-cemento de 0.38, empleando materiales de uso comercial en la provincia de Tucumán. Se utilizó un cemento Pórtland fillerizado CPF40 y una arena con módulo de fineza de 3. Se incorporó un aditivo superplastificante a base de éteres policarboxílicos. En la Tabla 3 se adjunta la dosificación del hormigón al cual corresponde el mortero usado.

Tabla 3: Dosificación del HAC por m<sup>3</sup>.

Materiales	Dosaje [kg]
Cemento (CPF40)	470
Agua	179
Arena	934
Binder	787
Aditivo	3,29

#### 2.1.1.1 Elaboración

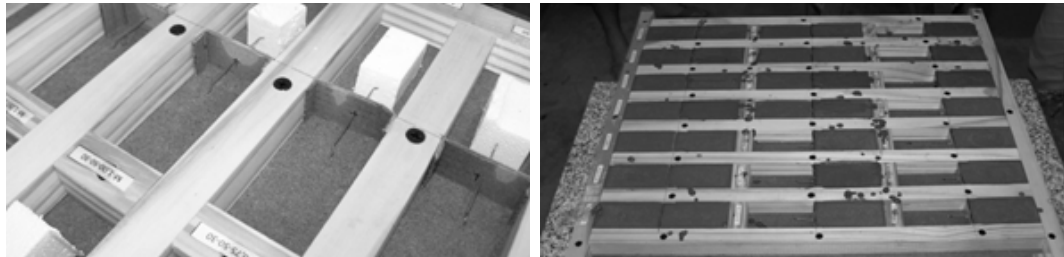
Se prepararon 3 pastones del mortero descrito de 2,5dm<sup>3</sup> cada uno y se moldearon 63 probetas de arrancamiento de 40 x 20 x 160 mm con 1 (una) fibra en la sección media para ensayarse a la edad de 28 días. Además se moldearon 6 probetas de 40 x 40 x 160 mm para la caracterización del mortero conforme Norma IRAM 1622.

Para la elaboración de cada pastón se incorporaron los materiales secos en una mezcladora normalizada y durante el primer minuto de mezclado en marcha lenta se incorporó el agua de amasado, reservando 50cm<sup>3</sup> aproximadamente para incorporar el aditivo químico durante los segundos finales. Luego se cambió la velocidad de amasado a marcha rápida y se mezcló durante 4 minutos, computando un total de 5 minutos de amasado.

Antes del moldeo de probetas se evaluó visualmente la fluidez de la mezcla y la ausencia de segregación.

Para ubicar la fibra en el centro del molde, se empleó un trozo de cartón que a la vez generaba una interrupción en la matriz simulando la fisura, ver Figura 3. Primero se colocó el mortero en una mitad de cada molde y minutos después en la otra mitad. Para asegurar que la fibra no se mueva durante el colado del mortero en la primera mitad, se colocó provisoriamente un prisma de poliestireno expandido en la mitad libre. Luego éste fue retirado para llenar la segunda mitad del molde donde estaba alojado.

Figura 3: Molde probeta de arrancamiento - Disposición de fibra.



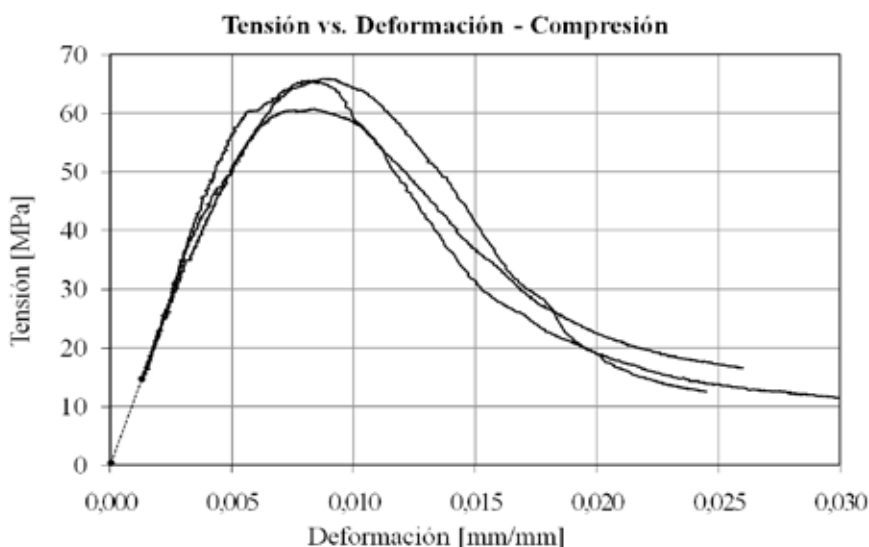
#### *2.1.1.2 Caracterización del mortero*

Las probetas moldeadas se ensayan a 28 días para caracterizar el mortero conforme la Norma IRAM 1622. La Figura 4 muestra las curvas tensión-deformación para el ensayo de compresión uniaxial. A partir de los resultados de estos ensayos se determinaron las siguientes propiedades mecánicas del mortero utilizado en las probetas:

Modulo de Elasticidad: 11600MPa

Resistencia a compresión: 60MPa

Figura 4: Resultados de ensayo a compresión uniaxial - Caracterización del mortero.

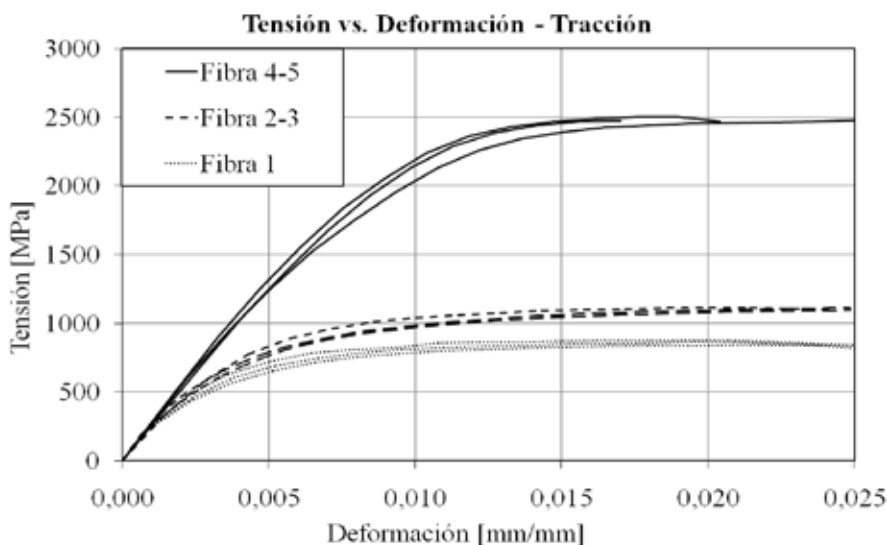


### 2.1.2 Fibras

La Tabla 2 muestra los distintos tipos de fibras estudiadas en los ensayos de arrancamiento y sus características geométricas y mecánicas. En todos los casos se trata de fibras de acero de sección circular con ganchos en las puntas. Las fibras difieren entre sí en el diámetro, la longitud, la geometría del gancho y la calidad del acero. Como indicadores de la calidad del acero se consignan las tensiones de fluencia especificadas por el fabricante (s/fabrica) y las medidas en ensayos de tracción de fibras realizados en el Instituto de Estructuras de la UNT (s/ensayo).

Para evaluar la tensión de fluencia se realizaron ensayos de tracción uniaxial de los 5 tipos de fibra. Los ensayos se efectuaron con control de desplazamiento, a una velocidad constante de 0.001mm/s. Los resultados se adjuntan en la Figura 5.

Figura 5: Resultados de ensayo fibras a tracción.



## 2.2 Ensayo de arrancamiento

El ensayo consistió en sujetar la probeta (Figura 2) por los extremos (ver Figura 6) y someterla a tracción uniaxial, registrando el desplazamiento aplicado y la carga o resistencia al arrancamiento que se genera. El ensayo se realizó con control de desplazamiento. Durante los primeros 5mm se aplicaron desplazamientos a una velocidad de 0.01mm/s, luego a 0.05mm/s hasta completar 10mm y finalmente a una velocidad constante de 0.1mm/s hasta extraer completamente la fibra.

Los desplazamientos se midieron con el transductor de desplazamiento interno de la máquina de ensayo que registra el movimiento del actuador. Para los valores de cargas con los que se trabaja no se generan deformaciones importantes en la máquina de ensayo. Por esta razón se toma el desplazamiento del actuador directamente igual al desplazamiento relativo de ambas mitades de la probeta. Se considera, además, que este desplazamiento relativo es directamente el deslizamiento de la fibra.

En las Figuras 6 y 7 se muestra la probeta montada en la máquina de ensayo antes y después del ensayo de arrancamiento respectivamente. En la Figura 8 se tienen dos probetas ensayadas donde se muestra el estado del gancho después del ensayo. La Figura 9 muestra el lote de 53 probetas ensayadas en las instalaciones del Instituto de Estructuras de la UNT.

Se observa que una vez extraídas la fibras de la matriz, el gancho de la fibra queda enderezado (ver Figura 7 y 8), pero con algunas imperfecciones. Estas imperfecciones, al estar localizadas en el extremo, mantienen una fricción constante durante el desli-



zamiento hasta la extracción completa de la fibra. En fibras lisas (eje recto), durante el proceso de deslizamiento la fricción va disminuyendo debido a una acción combinada de abrasión y compactación de la matriz alrededor de la fibra (Naaman 1991). Estos fenómenos de abrasión y compactación también se generan en las fibras con ganchos enderezados, pero no causan el mismo efecto en la fricción.

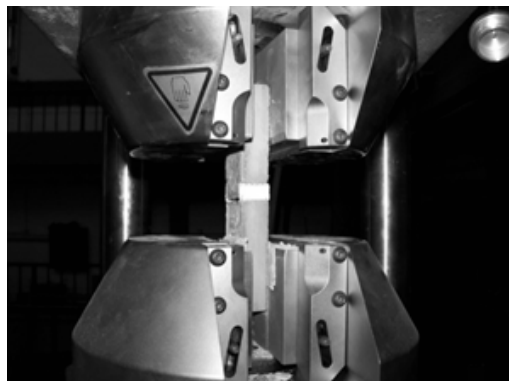


Figura 6: Probeta de arrancamiento al inicio del ensayo.



Figura 7: Probeta de arrancamiento después del ensayo.

Figura 8: Estado del gancho de las fibras después del arrancamiento.

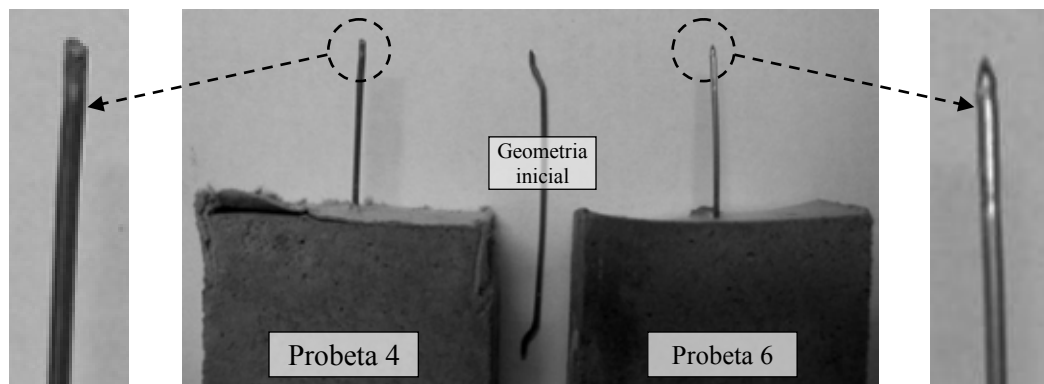
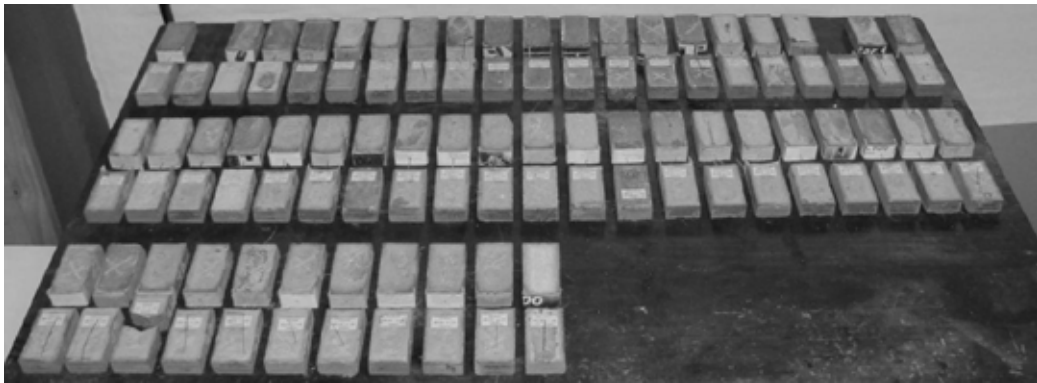
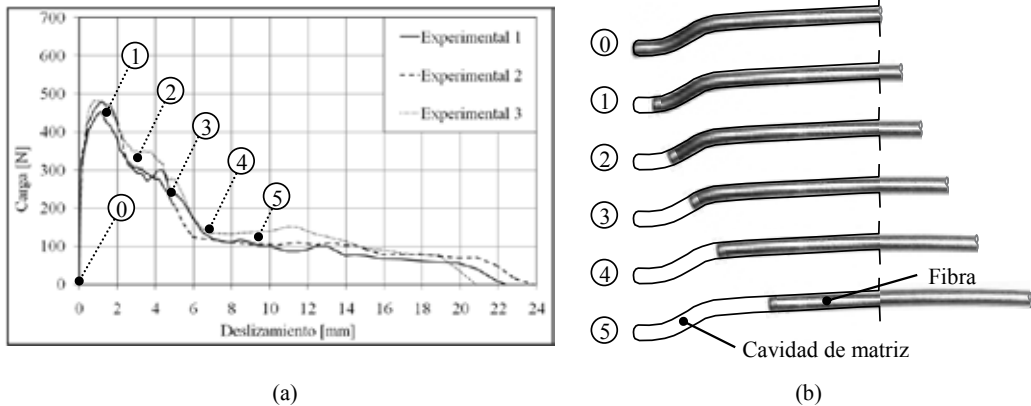


Figura 9: Lote de probetas de arrancamiento ensayadas.



A partir del ensayo, se pueden obtener las curvas carga-deslizamiento de las fibras, que tienen formas características, dependiendo principalmente del número de tramos curvos, la longitud de los tramos y los radios de curvatura de los mismos, en síntesis de la geometría del eje de la fibra. La forma de las curvas carga-deslizamiento y los valores de resistencia al arrancamiento también dependen del diámetro de la fibra, su textura superficial y calidad del mortero. En la Figura 10 se muestran resultados de ensayos de arrancamiento de la Fibra 2 y la relación que tienen con la forma del eje de la fibra a medida que se produce el deslizamiento.

Figura 10: Resultados de ensayo de arrancamiento de fibra 2. (a) Relación entre forma de curva y geometría del eje de la fibra. (b) Posición de la fibra dentro de la cavidad en la matriz durante el deslizamiento.



En la Figura 10-(a) se indico con números zonas características de la curva carga-desplazamiento y en la Figura 10-(b) se ilustran las posiciones correspondientes de la fibra dentro de la cavidad de la matriz. Se observa que, a medida que la fibra sale de la cavidad de la matriz va perdiendo tramos curvos, generando una variación importante

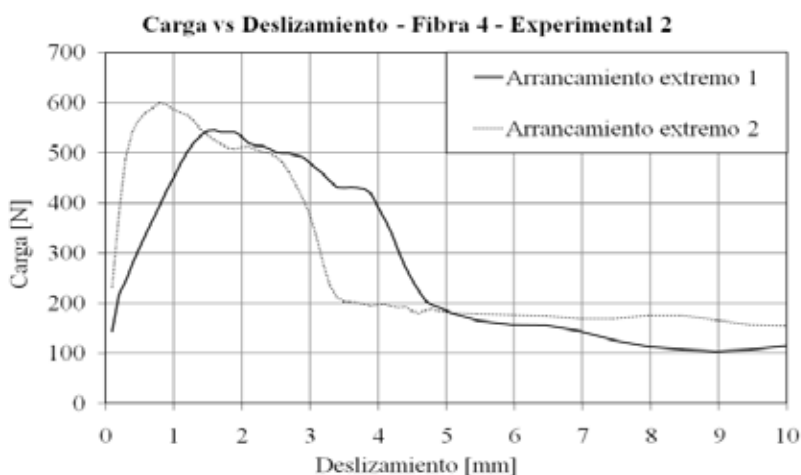
(a)

(b)

en la resistencia al arrancamiento. Esto pone en evidencia el beneficio de los tramos curvos en la resistencia al arrancamiento.

En la Figura 11 se adjuntan las mediciones de dos ensayos de arrancamiento de una misma probeta. Primero se realiza un ensayo donde se toman ambos extremos de la probeta y se aplica desplazamiento hasta que la fibra es arrancada completamente de un extremo. Luego se efectúa un segundo ensayo con la mitad de probeta en la cual quedó inmersa la fibra. Es de esperar que la máxima resistencia al arrancamiento del primer ensayo sea menor que la del segundo. En el grafico (Fig. 11) se puede observar que las curvas están desfasadas horizontalmente, esto se puede atribuir al probable deslizamiento de ambos extremos de la fibra durante el primer ensayo.

Figura 11: Resultados de los ensayos de arrancamiento de ambos extremos de la fibra.

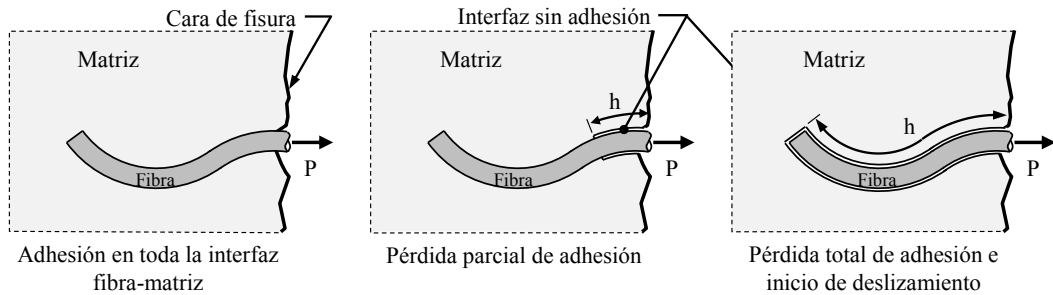


### 3 Estudio numérico

El modelo numérico empleado (Isla y Luccioni 2009) en la simulación está basado en los modelos originalmente desarrollados por Naaman (1991) (modelo para fibras lisas) y Chanvillard (1999) (modelo para fibras de geometría curva).

El análisis consiste en dos etapas, la primera contempla el proceso elastoplástico en la interfaz y la pérdida de adhesión entre fibra y matriz (fisura que envuelve la fibra y se propaga por la interfaz), hasta el inicio del deslizamiento (Naaman, 1991), ver Tabla 1 y Figura 12. La resistencia al arrancamiento es aportada por la adhesión y fricción en la interfaz.

Figura 12: Pérdida de adhesión en fibra - Etapa pre-deslizamiento.

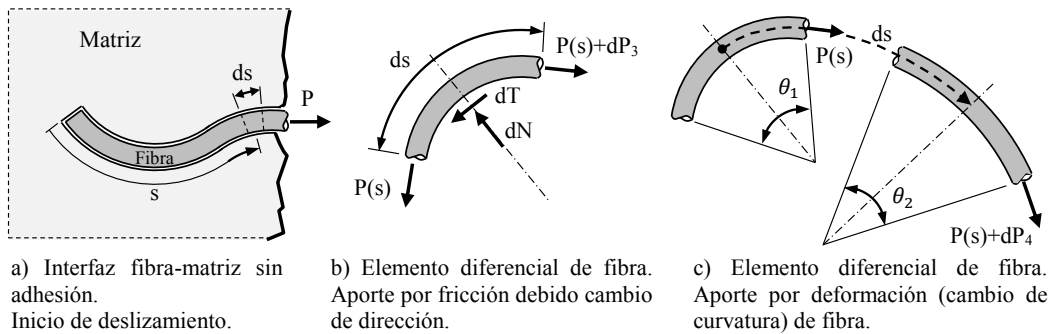


La segunda etapa comprende el proceso de deslizamiento de la fibra (Chanvillard 1999). Una vez que se ha perdido toda la adhesión en la interfaz, se inicia el movimiento de la fibra. En esta etapa se considera despreciable la deformación axial de la fibra. Se considera que la resistencia al arrancamiento es debida a dos efectos: la fricción y el cambio de curvatura de la fibra (Figura 13c). La fricción puede tener diversos orígenes. En este modelo se consideran los siguientes:

- Fricción generada por las irregularidades de la superficie de la fibra debidas al proceso de fabricación y al cambio de forma al que está sometida en el deslizamiento, y por el acúñamiento del material que se desprende de la matriz en el deslizamiento.
- Roce generado en zonas de cambio de dirección del eje de fibra (Figura 13b). El cambio de dirección en la fuerza axial, implica una fuerza perpendicular al eje que comprime la zona cóncava de la curvatura de la fibra contra la matriz.
- Roce generado por estado multiaxial de la matriz que confina lateralmente la fibra.

El modelo numérico empleado fue implementado como una componente en un modelo de compuesto, con lo cual es posible estudiar el comportamiento de una fibra individual o de un conjunto de fibras paralelas dispersas en forma homogénea en una matriz.

Figura 13: Deslizamiento de fibra de eje curvo - Componente de Roce y deformación.



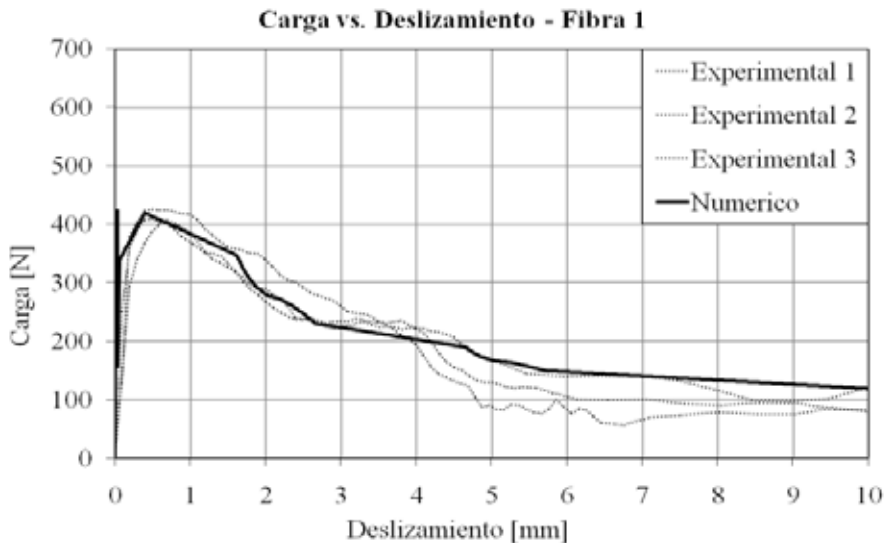
### 3.1 Determinación de parámetros de la matriz

En el ensayo de caracterización (apartado 2.1.1.2) se determinó la resistencia media a rotura y el modulo de elasticidad de la matriz. Pero para aplicar el modelo numérico es necesario conocer otros parámetros de la matriz además de los mencionados. En este trabajo se usan los resultados de los ensayos de arrancamiento de la fibra 1 para estimar los parámetros faltantes. En la Tabla 4 se resumen los parámetros de la matriz y en la Figura 14 se adjuntan resultados de ensayos.

Tabla 4: Parámetros de la matriz.

Resistencia a rotura Matriz [MPa]	60
Modulo de Elasticidad Matriz [MPa]	11600
Modulo de Adherencia [MPa]	1500
Tensión Tang. Máx. Adherencia [MPa]	18
Tensión Tangencial Fricción [MPa]	2.0
Coefficiente de Roce	2.20

Figura 14: Resultados de ensayo de arrancamiento de fibra 1 y calibración del modelo.



### 3.2 Simulación numérica

Una vez calibrados los parámetros de la matriz (apartado 3.1), se realizan simulaciones del ensayo para los tipos de fibras restantes, que tienen distintas geometrías del eje, diámetros y resistencias. Las curvas carga-deslizamiento obtenidas numéricamente y su comparación con las experimentales se muestran en las figuras 15 a 18.

En las Figuras 15 y 16 se observa un buen ajuste de los resultados numéricos y experimentales. En las Figuras 17 y 18 se puede ver que el modelo no reproduce satisfactoriamente los deslizamientos. En este caso, la diferencia observada entre los resultados experimentales y numéricos podría atribuirse al posible deslizamiento de ambos extremos de las fibras lo cual no está tenido en cuenta en el modelo numérico que considera el deslizamiento de un único extremo.

Figura 15: Resultados de ensayo de arrancamiento de fibra 2. Fibras de 1100MPa y  $\varnothing 1.10\text{mm}$

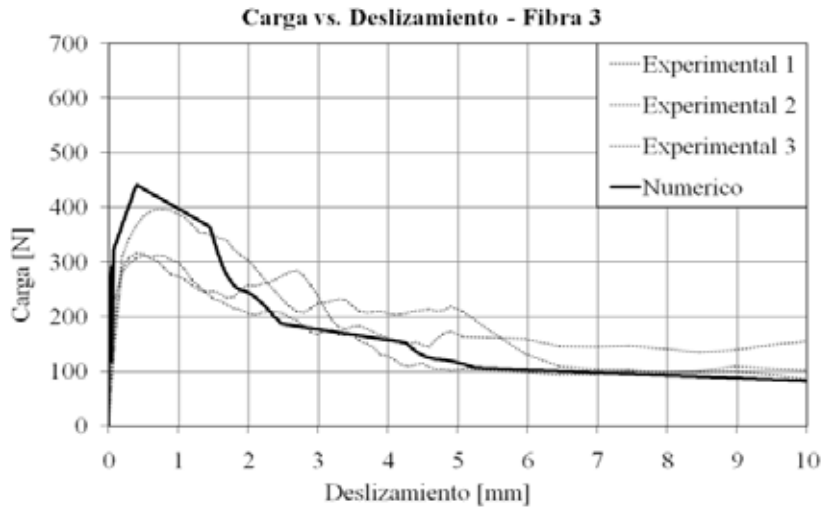


Figura 16: Resultados de ensayo de arrancamiento de fibra 3. Fibras de 1100MPa y  $\varnothing 0.75\text{mm}$

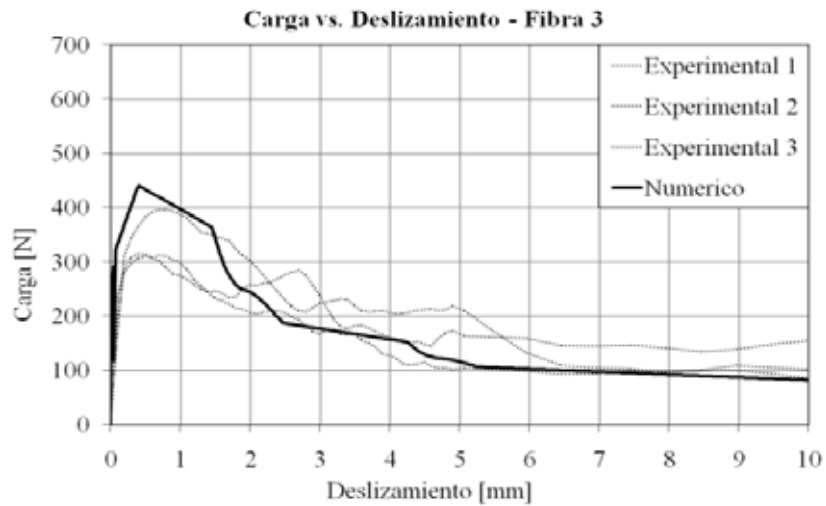


Figura 17: Resultados de ensayo de arrancamiento de fibra 4. Fibras de 2470MPa y  $\varnothing 0.71\text{mm}$

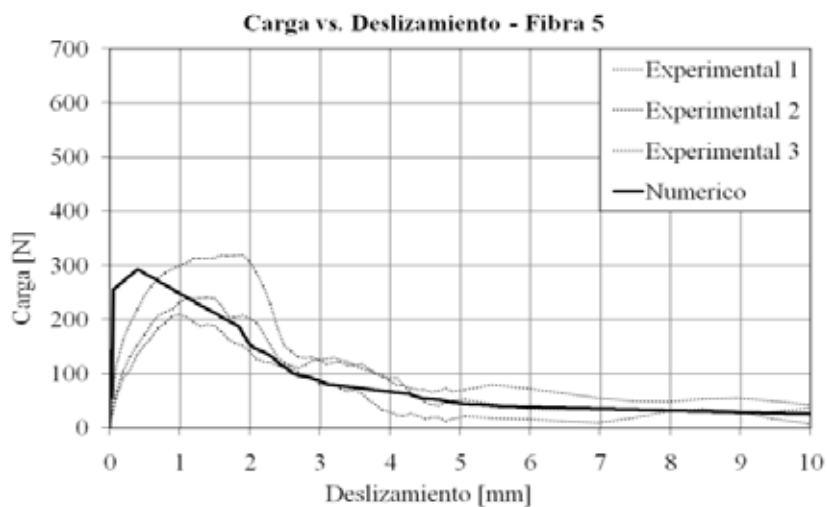
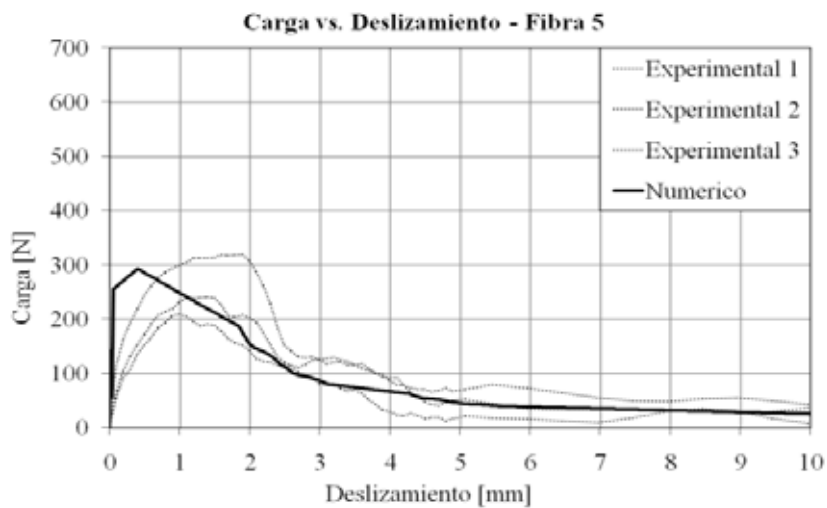


Figura 18: Resultados de ensayo de arrancamiento de fibra 5. Fibras de 2470MPa y  $\varnothing 0.45\text{mm}$





### 3.3 Relación de aspecto

Yan et al. (2001) realizaron una serie de ensayos de hormigón reforzado con fibras de acero en barra de presión de Hopkinson. Observaron que, a igual proporción de volumen de fibras, al pasar de una relación de aspecto de las fibras de 1/20 a una de 1/60, la deformación pico y la tenacidad se incrementaban marcadamente pero la resistencia a compresión y el módulo elástico decrecían.

Bayramov et al. (2004) realizaron ensayos de compresión y tracción indirecta sobre especímenes de hormigón reforzado con distintas proporciones de fibras de acero de distintas relaciones de aspecto. Observaron que, a igual proporción de volumen de fibras, las resistencias a compresión y tracción aumentaban con el aumento de la relación de aspecto de 55 a 65, pero disminuían al pasar a 80. Dedujeron entonces que cuando la relación de aspecto excede cierto valor, la adición de fibras al hormigón tiene el efecto de aumentar la ductilidad más que la resistencia.

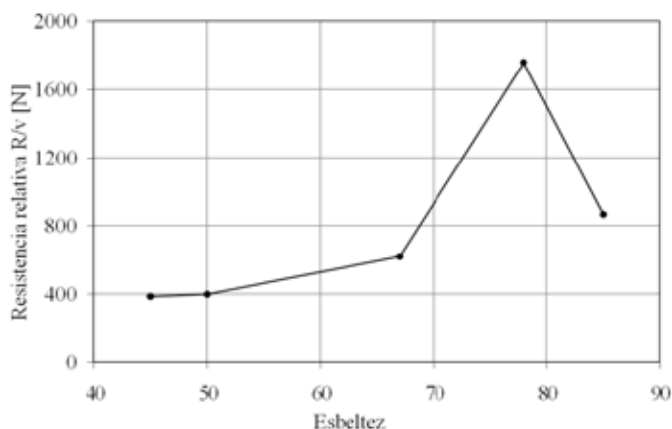
Mohammadi et al. (2009) realizaron ensayos de impacto en vigas de hormigón reforzado con fibras corrugadas de acero con distintas relaciones de aspecto y observaron que, a igual proporción de volumen el el hormigón con fibras con mayor relación de aspecto tenía mayor capacidad de absorción de energía.

A modo de resumen, el efecto de la relación de aspecto de las fibras en las propiedades mecánicas del hormigón reforzado con fibras de acero es significativo y existe un valor óptimo para resistencia en cada hormigón (Wang et al. 2010).

Tabla 5: Resistencia de fibras a igualdad de volumen

Fibra	Ø [mm]	L [mm]	Esbeltez L/Ø	Volumen [mm³]	Vol. relativo $v = (\text{Volumen})/(\text{Volumen Fibra 1})$	Resistencia Arrancamiento una fibra R [N]	Resistencia Equivalente R/v [N]
1	1.00	50	50	39	1.000	400	400
2	1.10	50	45	48	1.210	470	388
3	0.75	50	67	22	0.563	350	622
4	0.71	60	85	24	0.605	525	868
5	0.45	35	78	7	0.142	250	1760

Figura 19: Influencia de la esbeltez en la resistencia al arrancamiento



Con los resultados experimentales de las Figuras 15 a 18, se construye la Tabla 5, donde se estima la resistencia al arrancamiento de cada tipo de fibra considerando igualdad de volumen. A esta resistencia se la designa como resistencia equivalente y es una medida de la eficiencia de las fibras. Se estima como la resistencia al arrancamiento dividida en el volumen relativo. En este caso es claro que las fibras más esbeltas son más eficientes, pero a partir de cierto valor de esbeltez, la resistencia al arrancamiento decrece, ver Figura 19.

Esta observación respecto de la resistencia al arrancamiento guarda relación con los efectos que tiene la relación de aspecto de las fibras en el comportamiento del hormigón con fibras reportados por distintos autores.

## 4 Aplicación del estudio de arrancamiento al problema de tracción

La gran diferencia entre el hormigón convencional y el HRF es la respuesta en tracción. La respuesta en tracción del HRF depende fundamentalmente de las curvas carga- deslizamiento de las fibras y esta es la razón de la importancia del estudio de estas curvas.

A continuación se muestran los resultados de ensayos a tracción realizados por Barragán (2002). Se trata de ensayos a tracción uniaxial de probetas cilíndricas de HRF de 150mm de diámetro y 300mm de altura, con una entalla de 15mm de profundidad (Figura 20). La fibra empleada tenía las mismas características que la Fibra 4 del presente trabajo y la resistencia del hormigón era 41MPa.

En la Figura 21 se adjuntan los resultados experimentales y numéricos de "tensión vs. ancho de fisura", donde el ancho de fisura es equivalente al deslizamiento de la fibra.

Los resultados experimentales son los obtenidos por Barragán (2002), donde el ancho de fisura fue medido directamente y la tensión se estima como la carga aplicada dividida en la sección de la probeta. Finalizado el ensayo y separadas las mitades de la probeta se contaron las fibras que trabajaron en la sección de la fisura, estas fibras son llamadas fibras efectivas, se caracterizan por tener el gancho enderezado. En estos ensayos se contabilizaron en promedio 30 fibras efectivas.

Los resultados numéricos se obtuvieron mediante el modelo de arrancamiento de fibras (Isla y Luccioni 2009) implementado en la teoría de mezclas (Ruano y Luccioni 2009). En la calibración del modelo se emplearon los resultados experimentales de los ensayos de arrancamiento de la fibras 4 (Figura 17) del presente trabajo y el numero de fibras efectivas determinadas en el trabajo de Barragán (2002) con la cual se estima la proporción de fibra del HRF.

Figura 20: Configuración del ensayo a tracción uniaxial.

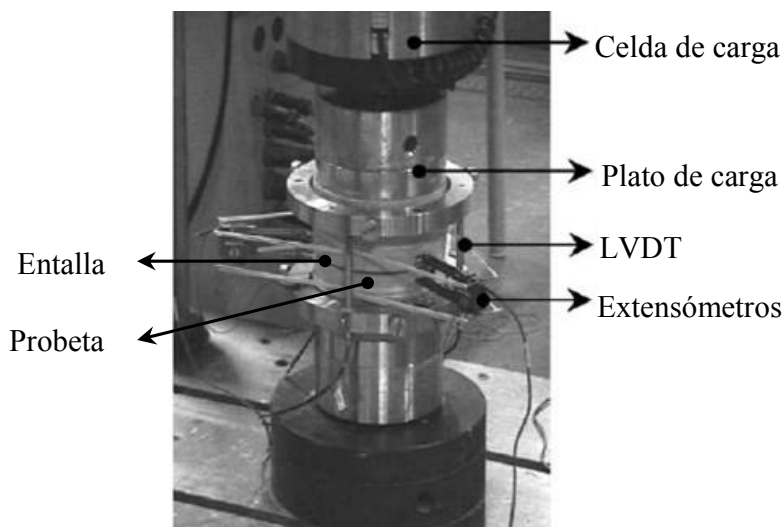
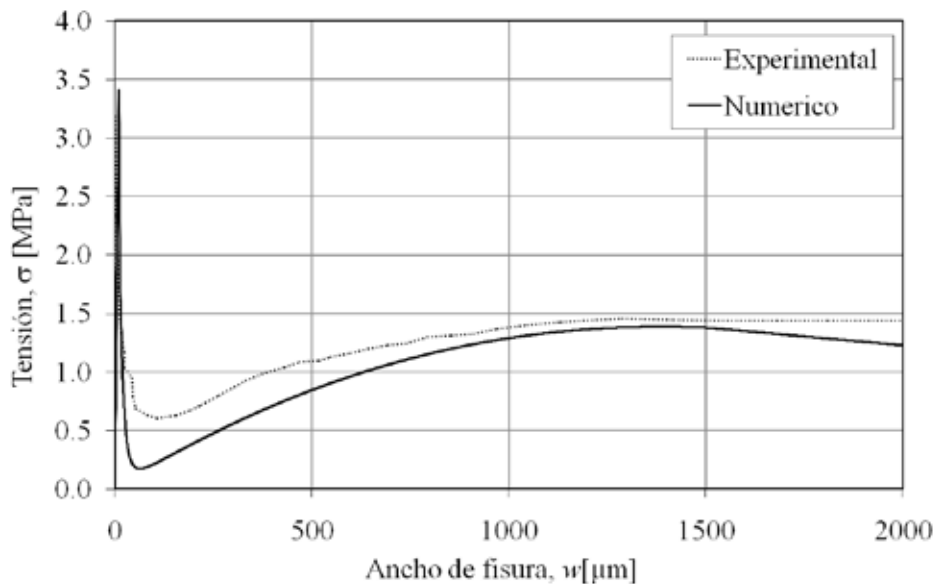


Figura 21: Ensayo de tracción uniaxial de HRF. Tensión vs. ancho de fisura.



## 5 Conclusiones

Los resultados de ensayos experimentales y numéricos de deslizamiento de fibras de acero en matriz de hormigón, manifiestan una marcada dependencia de la forma de la curva carga-deslizamiento respecto de la geometría inicial de la fibra (Fig. 10).

Se observa que a mayor diámetro de fibra, mayor es la resistencia al arrancamiento (Fig. 15 y 16) y a mayor resistencia del material de la fibra, también aumenta la resistencia al arrancamiento (Fig. 16 y 17). Las fibras con mayor resistencia al arrancamiento son, a su vez, más susceptibles a deslizar por ambos extremos.

A igual volumen de fibra y a mayor esbeltez se tiene mayor resistencia al arrancamiento (Tabla 5).

El estudio numérico permitió evaluar el modelo, logrando un buen ajuste del máximo valor de la resistencia de arrancamiento y poniendo en evidencia la necesidad de considerar el deslizamiento de ambos extremos de la fibra.

Es posible simular el comportamiento a tracción del HRF, con los resultados de arrancamiento de fibras y una estimación de la cantidad de fibras efectivas.

## 6 Referencias bibliograficas

- Alwan, Jamil M.; Naaman, Antoine E. y Guerrero, Patricia (1999). *Effect of mechanical clamping on the pull-out response of hooked steel fibers embedded in cementitious matrices*. Concrete Science and Engineering, v. 1, Marzo, p. 15-25.
- Barragán, B. E.; Gettu, Ravindra y Zerbino, Raul (2002). *Tensile Behavior of Steel Fiber Reinforced Concrete - Evaluation of a Test Methodology*. ACI SP-207-06, p. 91-110.
- Barragán, B. E.; Gettu, Ravindra; Martín, Miguel A. y Zerbino, Raul (2002). *Uniaxial tension test for steel fibre reinforced concrete-a parametric study*. Cement & Concrete Composites, n. 25, p. 767-777.
- Bayramov, F.; Taşdemir, C.; Taşdemir, M.A. (2004). *Optimisation of steel fibre reinforced concretes by means of statistical response surface method*. Cement and Concrete Composites, v. 26, n. 6, p. 665-75.
- Bazant, Zdenek P.; Fellow;ASCE; Li, Zhengzhi y Thoma, Michael (1995). *Identification of stress-slip law for bar or fiber pull-out by size effect tests*. Journal of engineering mechanics, v. 121, n. 5, p. 620-625.
- Chanvillard Giles (1999). *Modelos the pullout of wire-draw steel fibers*. Cement and Concrete Research 29, p. 1027-1037.
- Cunha, Victor M.C.F.; Sena-Cruz, José M. y Barros, Joaquim A.O. (2007). *Pullout behaviour of hooked-end steel fibres in self-compacting concrete*. Report 07-DEC/E06.
- Cunha Victor M.C.F., Sena-Cruz José M. y Barros J.A.O. (2008). *Impact of the fibre manufacturing quality on the fibre pullout performance*. Fibre Reinforced Concrete: Design and Applications, RILEM, p. 83-93.
- Guerrero, Patricia y Naaman, Antoine E. (2000). *Effect of mortar fineness and adhesive agents on pullout response of steel fibers*. ACI Material Journal, v. 97, n. 1, p. 12-20.
- Isla, Facundo A. y Luccioni, M. Bibiana. (2009). *Arrancamiento de fibras en hormigones reforzados con fibras*. AMCA, v. 28, n. 26, Constitutive Modeling of Materials (A), p. 2175-2198.
- Kanstad, Terje; Sandbakk, Sindre y Døssland, Åse L. (2007). *Pull-out testing of different Fibre types*. p. 23-32.
- Markovich, I.; van Mier, J.G.M y Walraven, J.C. (2001). *Single fiber pullout from hybrid fiber reinforced concrete*. Microlab/Concrete Structures, Delft University of Technology. HERON, v. 46, n. 3, ISSN 0046-7316.
- Mohammadi, Y.; Carkon-Azad, R.; Singh, S.P. y Kaushik, S.K. (2009). *Impact resistance of steel fibrous concrete containing fibres of mixed aspect ratio*. Construction and Building Materials, v. 23, n. 1, p. 183-189.
- Naaman, Antoine E.; Member; ASCE; Namur, George G.; Alwan, Jamil M. y Najm, Husam S. (1991). *Fiber pullout and bond slip. II: Experimental Validation*. Journal of Structural Engineering, v. 117, n. 9, September. ASCE, ISSN 0733-9445/91/0009-2791.
- Naaman, Antoine E.; Bentur, A.; Wu, S.T.; Banthia, N.; Baggott, R.; Hansen, W.; Katz, A.; Leung, C.K.Y.; Li, V.C.; Mobasher, B.; Robertson, R.; Soroushian, P.; Stang, H. y Taerwe, L.R. (1996). *Fiber-matrix interfaces*. High Performance Fiber Reinforced Cement Composite (HPFRCC2), RILEM, p. 149-192.

- Naaman, Antoine E. (2003). *Engineered steel fibers with optimal properties for reinforcement of cement composites*. Journal of advanced concrete technology, v. 1, n. 3, p. 241-252.
- Robins, P.; Austin, S. y Jones, P. (2002). *Pull-out behaviour of hooked steel fibres*. Materials and Structures, v. 35, p. 434-442.
- Ruano, G. y Luccioni, B. (2009). “*Comportamiento de elementos estructurales de hormigones reforzados con fibras*”. AMCA, v. 28, n. 26, p. 1941-1960.
- Sujivorakul, C. y Naaman, Antoine E. (2003). *Modeling bond components of deformed steel fibers in FRC composites*. High Performance Fiber Reinforced Cement Composite (HPFRCC4), RILEM, p. 35-48.
- Weiler Bernd y Grosse Christian. *Pullout behaviour of fibers in steel fiber reinforced concrete*.
- Wang, Z.L.; Wu, J. y Wang, J.G. (2010). *Experimental and numerical analysis on effect of fibre aspect ratio on mechanical properties of SRFC*. Construction and Building Materials, n. 24, p. 559-565.
- Yan ,S.H.; Qian, Q.H.; Sun, W. y Yin, F.L. (2001). *Stress–strain relationship of high-strength steel fibre reinforced concrete in compression*. J Southeast Univ , v. 31, n. 2, p. 77-80.

# Pullout of steel fibers from concrete matrix

## ABSTRACT

Experimental research that shows the improvements in structural behavior of concrete with the addition of fibers has been developed in the last years. Fibers control cracking increasing ductility. This effect is directly related to the fibers pull out resistance and depends on the fibers, matrix and the fiber-matrix interface. Experimental results exhibit a great variability in results even for the same type of fibers and concrete. This variability can be attributed to the concrete matrix that produces differences in the interface. The pull-out of hooked end steel fibers from a concrete matrix is experimentally and numerically studied in this paper. Experimental results corresponding to different types of fibers are presented. These results are used for the calibration of the numerical model. The model of the fiber considering debonding is implemented as a component in a composite. In this way the behavior of an individual fiber or of a set of fibers homogeneously distributed in a matrix can be simulated. Numerical simulations of the pull out tests are performed and the comparison of numerical and experimental results is presented.

*Keywords:* Fiber, steel, concrete, hooks, friction, compose

## 1 Introduction

Fiber reinforced concrete (FRC) is a concrete to which different types of fibers are added and scattered in the brittle matrix to improve energy absorption capacity and to control cracking progress. In this way the lifetime of structures is increased, especially when they are exposed to dynamical loads. It is evident that FRC properties directly depend on the type, content, orientation and distribution of fibers. The presence of cracks in the matrix is necessary for the activation of the fibers working mechanism. Fibers join cracks and slow down their propagation and, as a result, more cracks of smaller size are produced. If there are enough fibers and they are uniformly distributed they prevent microcracks from joining and the matrix apparent tensile strength is increased.

The tensile strength of FRC is the result of a joint action of matrix strength and the fibers bridging the cracks. Fibers matrix bonding has several components: Physical and/or chemical adhesion, frictional strength and a mechanical component associated with the fiber geometry that acts as an anchorage. In most cases, fibers are pulled out from the matrix once they have lost their adherence to it, before reaching rupture. Therefore, the longer the fibers the greater the capacity to resist pull out forces. This phenomenon is normally studied through experimental tests called pull-out tests Alwan (1990), Naaman (1991), Bazant (1995), Naaman (1996), Chanvillard (1999), Guerrero (2000), Barragán (2002), Robins (2002), Naaman (2003), Sujivorakul (2003), Kanstad (2007), Cunha (2007) and Cunha (2008).

For the case of straight fibers immersed in concrete the basic components contributing to pull out strength are adhesion and friction. The relation between shear stress in fiber-matrix interface and fiber slipping is shown in Figure 1. When an axial force is applied to the fiber (see Table 1), adhesion initially acts on the total length of the fiber. Shear stresses in the fiber-matrix interface are not uniform and the maximum stresses are located near the crack. If the axial force is increased beyond the adhesion strength, the fiber begins to debond from the matrix and friction starts in these zones. When the complete interface has lost adhesion, slipping is initiated with a marked drop in pull out strength that is only provided by friction. As the fiber is pulled out, friction decreases due to a combined action of abrasion and cement and sand particles compaction around the fiber. This is the case of straight fibers. To prevent the sharp drop of pull out strength when adhesion has run through, fibers with special geometry, as fibers with hooks or button at their ends or wavy fibers or fibers with polygonal cross section are used. In this way a mechanical component is added to pull out strength.

Pull out strength also depends on matrix integrity. If the matrix is progressively disintegrated as the fiber is pulled out, all the resistant capacity and ductility of the fibers cannot be exploited. For this reason, some authors have tried to combine fibers of different sizes where the shorter fibers are responsible of preserving the stability of the matrix while the longer fibers bridge the cracks developing the maximum capacity of the later (Markovich, van Mier y Walraven 2001).

The different mechanisms that take place during hooked fibers pull out and that contribute to the pull out strength are experimentally and numerically studied in this paper. The numerical program includes pull out tests with different types of steel fibers but the same concrete matrix. A numerical model for the pull out phenomenon was developed and the corresponding concrete parameters were calibrated with one type of fibers. Then the model was applied to the simulation of the rest of the pull out tests and a tension test of FRC.

## 2 Experimental Program

63 tests pull out specimens as those shown in Figure 2 with the same concrete matrix and five types of fibers (Table 2) were cast. All of them were tested with an INSTRON load equipment under displacement control.

### 2.1 Pull out specimens

The specimens were prismatic with rectangular cross section and an interruption in the middle that separated them in two parts that are joined by a fiber in the center as shown in Figure 2. The specimens were tested under uniaxial tension. The matrix interruption simulates the crack and allows the evaluation of the fiber pull out resistance.



## 2.2 Pull out tests

The test consists of fixing the specimen by its ends (Figures 2 and 6) and subjecting it to uniaxial tension, registering the displacement and the applied load. A loading rate of 0.01mm/s was applied during the first 5mm, then the load rate was increased to 0.05mm/s up to 10mm and finally, a constant load rate of 0.1mm/s was applied until the fiber was completely pulled out.

The specimen in the test machine, before and after the test, is shown in Figures 6 and 7 respectively. The appearance of the fibers hooked ends after the tests is presented in Figure 8. It can be seen that after the test the fiber end is straight but with some imperfections (Figures 7 and 8). These imperfections are located at fibers ends and thus maintain a constant friction during the slipping up to the complete pull out. In the case of straight fibers, friction decreases during the slipping due to a combined action of abrasion and compaction of the matrix around the fiber (Naaman 1991). These phenomena of abrasion and compaction also take place in the case of hooked end fibers but they do not have the same effect on friction.

The load displacement curves obtained from the tests have different shapes mainly depending on the number of curve parts, the length of the parts and their curvature ratio, that is, on the fiber axis geometry. The final shape and the pull out strength also depend on the fiber diameter, its surface texture and the mortar quality. The results of Fiber 2 test and their relation with the shape of the fiber axis are shown in Figure 10. A marked variation of pull-out strength is evident in coincidence with curve parts showing the important contribution of curve parts to pull out strength.

The results of the pull out test of both ends of the same specimen are presented in Figure 11. First, both ends of the specimen are subjected to uniaxial tension until one of the fiber ends is completely pulled out from the matrix. Then, the second test is performed with half of the specimen where the fiber remains immersed. The maximum pull out strength of the first test is expected to be lesser than that of the second test. In the ideal case of a completely symmetric fiber but a little displaced from the center of the specimen one of the ends would resist less to the pull out force. Observing the curves in Figure 11 it is evident that both ends slipped during the first test until the weaker end was pulled out and the other one was unloaded.

## 3 Numerical study

The numerical model used (Isla and Luccioni 2009) is based on the models originally developed by Naaman (1991) (model for straight fibers) and Chanvillard (1999) (model for curve axis fibers).

### 3.1 Matrix parameters estimation

The mean compression strength and the elasticity modulus can be determined from standard characterization tests. The rest of the matrix parameters used in the numerical model are obtained from the results of the pull out test of fiber 1. The matrix parameters obtained are presented in Table 4 and the test results and dimensions of the fiber are shown in Figure 14.

### 3.2 Numerical simulation

The comparison of numerical and experimental results is presented in Figures 15 to 18. A good agreement is achieved in the cases presented in Figures 15 and 16 but not in the cases of Figures 17 and 18. In the last case, the difference observed between numerical and experimental results could be attributed to the slipping of both fiber ends that is not considered in the numerical model.

Pull out strength for the same fiber volume is estimated in Table 5 using the results in Figures 15 to 18. This strength is called equivalent strength and it is a measure of fiber efficiency. It is calculated as the fiber strength divided by the specific volume (fiber volume/fiber 1 volume). It can be seen that more slender fibers are more efficient.

## 4 Conclusions

Experimental and numerical results presented evidence of a marked influence of fiber geometry on the load-displacement curves obtained for the pull out tests.

The pull out strength increases with the fiber diameter and with strength of the fiber material. Fibers with greater pull out strength are more likely to slip from both ends.

Slender fibers give a greater pull out strength for the same fiber volume. The numerical study showed the need of considering both ends slipping.

The tensile behavior of FRC can be simulated using the results of fiber pullout test and an estimation of the effective fiber amount.